

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

CONFIDENTIEL

**ÉTUDE DES POSSIBILITÉS D'EXPLOITATION
DE L'EAU CHAUDE DU DOGGER
DANS LA RÉGION D'EMERAINVILLE (Seine-et-Marne)**

par

G. CORNET et R. GABLE



Département géothermie

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

75 SGN 028 GTH

Orléans, novembre 1974

RESUME

Cette étude a pour but de préciser les conditions d'extraction d'eau chaude du Dogger en vue de chauffer de nouveaux logements dans la région d'Emerainville à l'Est de Paris (entre la Seine et la Marne, au Sud de Lagny).

A partir de 1704 m de profondeur, le Dogger, épais de 140 m, recèle 100 m de formations calcaires de porosité supérieure à 6 % et d'une valeur moyenne de 13 %, pouvant former réservoir.

L'eau de gisement a une salure élevée de 30 g/l, principalement due au chlorure de sodium ; sa température est de $70^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Deux données essentielles restent légèrement imprécises, faute de renseignements que n'ont pu fournir les forages proches :

- 1) la perméabilité qui a été estimée à 0,4 darcies d'après celle de la région de Melun au Sud et à 0,1 darcie d'après des tests pétroliers. Les calculs ont été faits avec ces deux valeurs ;
- 2) la pression de gisement qui paraît exceptionnellement élevée dans la région, mais sans confirmation certaine de la seule valeur connue : 38 kg/cm^2 , à 15 km au Sud-Est de Pontcarré.

Les calculs ont été faits pour trois valeurs de cette pression (10 kg, 15 kg, 20 kg).

Des abaques simples permettent d'estimer les puissances de pompage (extraction et injection) pour les deux valeurs de perméabilité et pour toutes pressions comprises entre 10 et 20 kg/cm^2 . Pour la pression la plus vraisemblable, 15 kg/cm^2 , et un débit de 150 m^3/h , le forage sera artésien si la perméabilité est de 0,4 darcie. Un pompage à 150 m de profondeur exigeant une puissance de 144 CV sera par contre nécessaire si cette perméabilité est de 0,1 darcie.

Le système proposé étant celui de l'injection des eaux utilisées dans le Dogger afin d'éviter la pollution en surface et d'assurer l'entretien des pressions de la nappe (système du doublet de forage), il sera nécessaire de disposer d'une puissance d'injection de 165 CV pour réaliser cette injection si la perméabilité est de 0,4 darcie et de 285 CV dans le cas où elle serait limitée à 0,1 darcie.

En tout état de cause, l'opération est donc réalisable, mais la détermination des perméabilités devra précéder l'achat des pompes.

Quelques précautions pour le contrôle de l'action chimique des eaux et pour la détection des fuites dans les terrains superficiels à partir du forage d'injection sont également indiquées.

Un programme de forages, les spécifications techniques et l'équipement de ceux-ci, une estimation des délais et des coûts sont enfin donnés.

SOMMAIRE

	Pages
I - INTRODUCTION	1
1 - GENERALITES	1
2 - INTERET DE L'INJECTION DES EAUX UTILISEES	1
II - ETUDE GEOLOGIQUE	2
1 - PREVISIONS DE FORAGE, NATURE ET PROFONDEUR DU RESERVOIR	2
2 - APERCU STRUCTURAL ET VARIATIONS DE FACIES DES ROCHES	3
III - CARACTERISTIQUES LOCALES DU RESERVOIR	4
1 - PROFONDEUR DU TOIT DU RESERVOIR	4
2 - TEMPERATURE DE L'EAU DU GISEMENT	4
3 - EPAISSEUR DU RESERVOIR ET POROSITE	4
4 - PERMEABILITE DE L'AQUIFERE	4
5 - PRESSION DE GISEMENT	5
6 - HYDRODYNAMISME NATUREL	5
7 - ESPACEMENT ENTRE LES FORAGES D'EXTRACTION ET D'INJECTION	6
8 - CHIMIE DES EAUX - MESURES PHYSICO-CHIMIQUES NECESSAIRES	6
IV - POMPAGE ET INJECTION. ESTIMATION DES PRESSIONS	8
1 - GENERALITES	8
2 - EXPRESSION DES FAITS	8
3 - PRESSION DE GISEMENT (P_g)	9
4 - PERTES DE CHARGES DANS L'EQUIPEMENT DE FORAGE (P_{cq})	9
5 - PRESSION HYDRODYNAMIQUE DE DEBIT (P_{hq})	9
6 - PUIITS D'EXTRACTION	9
7 - PUIITS D'INJECTION	10
8 - RESULTATS	11
8.1 - Puits d'extraction	11
8.2 - Puits d'injection	12
9 - PRESSION HYDRODYNAMIQUE D'INJECTION P_{hq} ET PRESSION DE FRACTURA- TION	14
10 - PUISSANCES DE POMPAGE UTILISEES	14
10.1 - Extraction	15
10.2 - Injection	15
11 - PUISSANCE THERMIQUE DISPONIBLE	15
V - CONCLUSIONS SUR L'ETUDE HYDRODYNAMIQUE	17
VI - REALISATION DES FORAGES	18
1 - GENERALITES	18
1.1 - Forages inclinés	18
1.2 - Forage d'extraction	18
1.3 - Forage d'injection	18
1.4 - Cas de deux doublets	18
1.5 - Intérêt de l'acidification	19

	Pages
2 - PROGRAMME DE FORAGES DIRIGES	19
2.1 - Génie civil	19
2.2 - Déroulement	19
2.3 - Programme boue	19
2.4 - Composition des tubages	20
2.5 - Opérations S.P.E. (diagraphies)	20
2.6 - Programme d'essais sur le réservoir	21
3 - EQUIPEMENT DES PUIITS	21
4 - DELAIS	21
 VII - DEVIS ESTIMATIF	 22
1 - FORAGE	22
2 - ESSAI DE POMPAGE	22
3 - EQUIPEMENT DES PUIITS	22
4 - GROUPE DE POMPAGE	23
 VIII - CONCLUSIONS GENERALES	 24

LISTE DES FIGURES, PLANCHES ET TABLEAUX

	Pages	
<u>Figures</u> 1 - Carte des isobathes au toit du Dogger (1/500 000)	3	✓
2 - Coupes du Dogger	3	✓
3 - Carte des pressions de gisement au toit du Dogger (1/500 000) ..	5	✓
4 - Carte des salinités du Dogger (1/500 000)	6	✓
5 - Diagrammes d'analyse d'eau	6	0
6 - Puits d'extraction, abaque pour Pdq	12	
7 - Puits d'injection, abaque pour Piq	13	
8 - Schéma de doublets	18	
<u>Tableaux</u> 1 et 2 - Puits d'extraction : pressions de pompage	11-12	
3 et 4 - Puits d'injection : pressions d'injection	13	
<u>Planches</u> I - Coupe géologique W:NW ; E:SE		✓
II - Coupe géologique SW ; NE		✓

I - INTRODUCTION

1 - GENERALITES

Cette étude a pour but de préciser les possibilités d'exploitation d'une nappe d'eau chaude souterraine pour le chauffage de cités urbaines devant être construites dans la région d'Emerainville (en x : 621,300 et y : 123,500).

Des principales nappes captives profondes reconnues dans cette partie du Bassin parisien, celle du Dogger doit être retenue à cet effet. La nappe de l'Albien y est trop peu profonde pour fournir une eau assez chaude et celle du Trias trop peu connue pour faire l'objet d'un projet.

Nous nous appliquerons donc à déterminer les caractéristiques de cette nappe du Dogger, profondeur, température, perméabilité, etc., données naturelles fixant les limites des possibilités, à partir desquelles seront précisés les débits à espérer, l'énergie nécessaire à la mise à la disposition de la ressource, les spécifications techniques et les coûts de l'opération.

Une première partie de cette étude analysera les données naturelles et définira les conditions d'obtention d'une gamme de débits allant de 50 m³/h à 200 m³/h.

Une seconde partie décrira les caractéristiques des ouvrages, les spécifications techniques à respecter, enfin le programme et le coût des réalisations.

2 - INTERET DE L'INJECTION DES EAUX UTILISEES

Il est proposé de procéder à l'injection de l'eau utilisée dans sa formation d'origine afin d'éviter les problèmes de pollution que poserait le rejet en surface ou dans des nappes peu profondes. Accessoirement, ce système assure le maintien de la pression de la nappe. Cette injection se fera à l'aide d'un second forage d'où le nom de "doublet" donné à l'ensemble.

L'écartement des forages doit être suffisant pour éviter le recyclage de l'eau froide pendant la durée du doublet fixée à 30 ans, période de vie moyenne reconnue pour des forages d'eau et durée raisonnable de l'amortissement.

II - ETUDE GEOLOGIQUE

1 - PREVISIONS DE FORAGE. NATURE ET PROFONDEUR DU RESERVOIR

La série des terrains qui seront rencontrés est déduite des travaux pétroliers de la région et plus particulièrement du forage le plus proche : Pontcarré 1.

Les profondeurs sont données à partir du sol.

Quaternaire et Tertiaire : 0 à 200 m

- marne, grès et calcaire (115 m) jusqu'à 115 m
- marne (85 m) jusqu'à 200 m

Crétacé supérieur de 200 à 706 m (506 m)

- craie blanche à silex noirs très abondants (317 m) jusqu'à ... 517 m
- craie grise plus marneuse (86 m) jusqu'à 603 m
- craie très marneuse grisâtre (12 m) jusqu'à 615 m
- marno-calcaire très gréseux (65 m) jusqu'à 680 m
- marne sableuse et calcaire gréseux et glauconieux (26 m) jusqu'à 706 m

Crétacé inférieur de 706 m à 1033 m (327 m)

- marne plastique noire du Gault (Albien supérieur ; 44 m) jusqu'à 750 m
- sable jaune et vert à passées d'argile sableuse (Albien inférieur et Aptien ; - 87 m) jusqu'à 837 m
- marne sableuse gris-noir (34 m) jusqu'à 871 m
- argile sableuse bariolée (rouge et blanche ; - (33 m) jusqu'à 904 m
- marne grise sableuse (47 m) jusqu'à 951 m
- calcaire marneux brun clair (banc repère ; - 7 m) jusqu'à ... 958 m
- grès marneux et argile pyriteuse à lignite (faciès Wealdien ; - 74 m) jusqu'à 1032 m

Ces cinq derniers termes représentent un Crétacé inférieur indifférencié comprenant le Barrémien et le Néocomien.

Jurassique supérieur de 1032 m à 1702 m (730 m)

- calcaire marneux, puis calcaire fin, puis calcaire pseudo-oolithique, enfin dolomie et calcaire dolomitique passant à des marno-calcaires (Purbeckien ; - 47 m) jusqu'à 1079 m
- calcaire sublithographique, marno-calcaire noir, puis calcaire sublithographique passant à des alternances de calcaire marneux et de marno-calcaire à huîtres, enfin calcaire sublithographique (Portlandien ; - 119 m) jusqu'à 1198 m
- alternance de marne schisteuse noire et calcaire marneux fin en bancs plus épais à la base (Kimméridgien ; - 129 m) jusqu'à 1327 m
- calcaire marneux et calcaire oolithique alternant, puis calcaire compact parfois oolithique, devenant détritique et parfois récifal, mais plus ou moins marneux (Séquanien et Rauracien ; - 145 m) jusqu'à 1472 m

- marno-calcaire gréseux, puis marne noire schisteuse avec marno-calcaire gréseux, enfin marne sableuse (Argovien ; - 87 m) jusqu'à 1559 m
- marne schisteuse et pyriteuse avec marno-calcaire (banc de calcaire beige fin au sommet ; 0,5m) puis calcaire marneux beige et marno-calcaire pyriteux, enfin marne schisteuse et pyriteuse avec quelques bancs calcaires (Oxfordien ; - 108 m) jusqu'à 1667 m
- banc repère de calcaire à oolithes ferrugineuses (3 m) puis marne et marno-calcaire gris-noir zoogène (Callovien ; - 35 m) jusqu'à 1702 m

Jurassique moyen (Dogger)

Le forage de Pontcarré n'ayant recoupé que la partie très supérieure du Dogger, la coupe est établie à partir des forages de Coupvray 1 et Favières 1 pour cette formation.

- calcaire marneux puis calcaire compact oolithique (Bathonien ; 15 m) jusqu'à 1717 m
- calcaire sublithographique et calcaire noduleux et graveleux poreux, devenant oolithique et formant un premier réservoir (Bathonien ; 90 m) jusqu'à 1807 m
- calcaire dolomitique et dolomie cristalline (Bathonien ; 13 m) jusqu'à 1820 m
- calcaire oolithique crayeux, poreux, formant réservoir (Bathonien ; 15 m) jusqu'à 1835 m
- calcaire marneux zoogène et calcaire compact (Bajocien ; 15 m) jusqu'à 1850 m
- marnes calcaires à huîtres et marnes (Bajocien ; 40 m) jusqu'à 1890 m

2 - APERCU STRUCTURAL ET VARIATIONS DE FACIES DES ROCHES

La figure 1 donne une carte des profondeurs du toit du Dogger. Elle montre que le Dogger est incliné vers l'Est et marque un léger bombement entre Paris et Emerainville. La profondeur à prévoir pour le projet est de l'ordre de 1700 m avec une marge d'erreur de ± 25 m causée par la présence de failles locales ayant pu échapper à la prospection géophysique.

Les planches I et II donnent une coupe N.NW-E.SE et une coupe N.NE-S.SW montrant les variations de faciès et de profondeur dans la région.

La figure 2 donne les coupes détaillées des forages proches, la coupe supposée du Dogger à Emerainville et les variations de porosité dans le réservoir déterminées à partir des diagraphies "neutron" et "sonic".

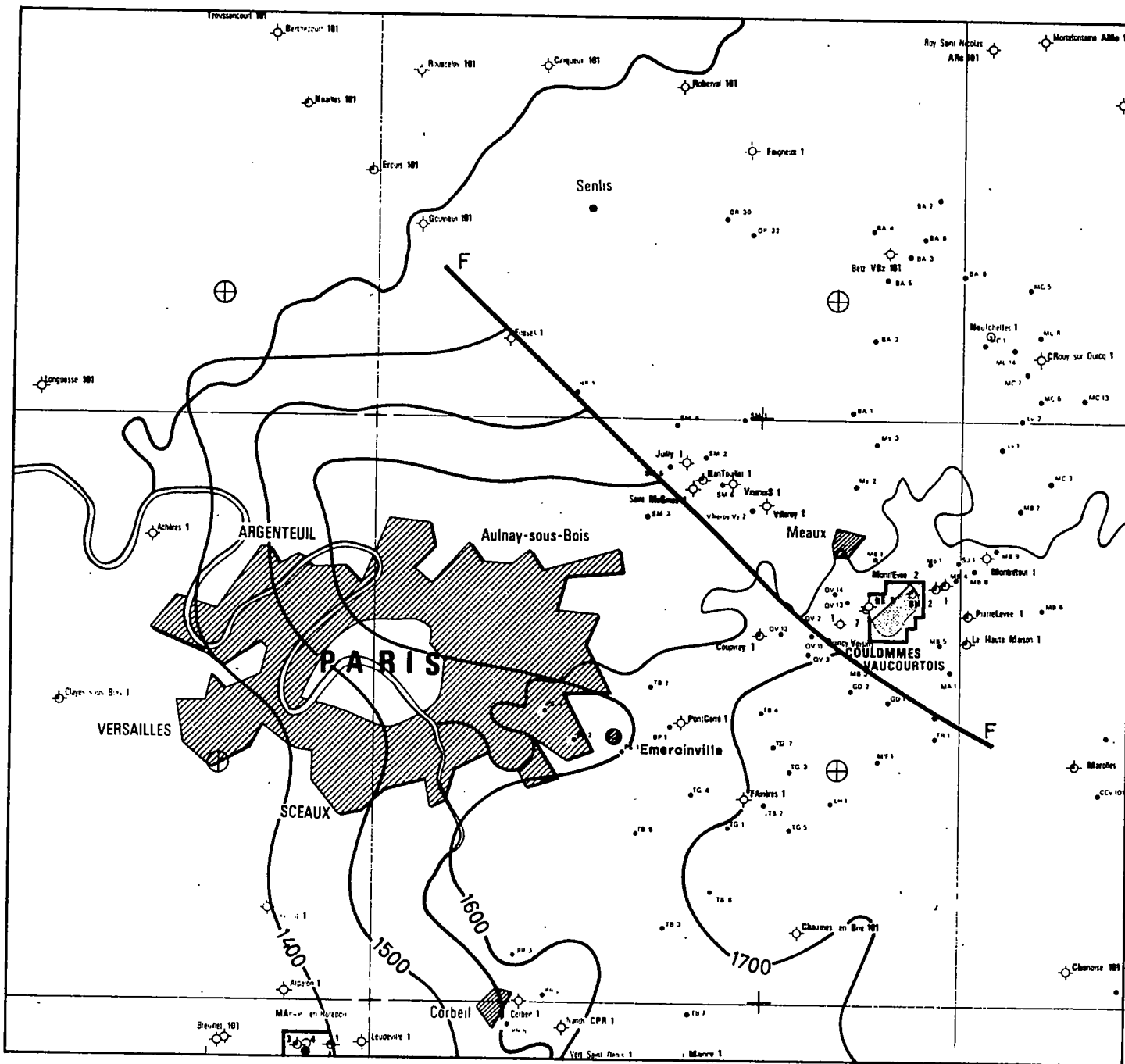


Fig. 1 — Carte des isobathes au toit du Dogger
 1/500 000
 (en mètres au dessous du niveau de la mer)

- ⊕ Forage
- Courbe isobathe

III - CARACTERISTIQUES LOCALES DU RESERVOIR

1 - PROFONDEUR DU TOIT DU RESERVOIR

A Emerainville, en se basant sur les forages voisins et en tenant compte du pendage des couches, le toit du Dogger serait à une profondeur de 1702 m et le toit du premier réservoir (1er niveau calcaire ayant une porosité appréciable) se situerait vers 1717 m. Il n'est pas impossible cependant que les calcaires compacts compris entre 1702 m et 1717 m soient fissurés et fournissent déjà un débit intéressant. L'interprétation des données de géophysique montre cependant qu'il faut introduire une marge d'erreur de ± 25 m. Pratiquement on peut estimer que la profondeur du 1er réservoir est de 1717 m ± 25 m.

2 - TEMPERATURE DE L'EAU DE GISEMENT

Les gradients géothermiques fournis par les forages voisins sont de l'ordre de 3°3 à Corbeil 1, 3°3 à Carrières-sur-Seine, 3°3 à Pontcarré (forage le plus proche), 3°58 à Villeroy, 3°60 à Nandy, 3°39 à Nangis et Melun. On peut estimer qu'à Emerainville le gradient est de l'ordre de 3°3. La température de l'eau du Dogger serait alors de l'ordre de 70° ± 5 °.

3 - EPAISSEUR DU RESERVOIR ET POROSITE

L'épaisseur du réservoir, plus particulièrement l'épaisseur efficace ou somme des épaisseurs des couches ayant une porosité suffisante (supérieure à 6 %) pour former un réservoir, est tirée des diagraphies "neutron" et "sonic" réalisées dans les forages proches (fig. 2).

L'épaisseur efficace totale observée est de l'ordre de 100 m et la porosité moyenne des couches de 13 %.

4 - PERMEABILITE DE L'AQUIFERE

Cette grandeur est difficile à estimer en l'absence de pompages d'essai (ou d'essais de débit) prolongés pendant un temps suffisant pour que la valeur obtenue puisse être représentative d'un volume de terrain assez grand autour du forage.

Nous disposons de deux sources d'information pour estimer la perméabilité :

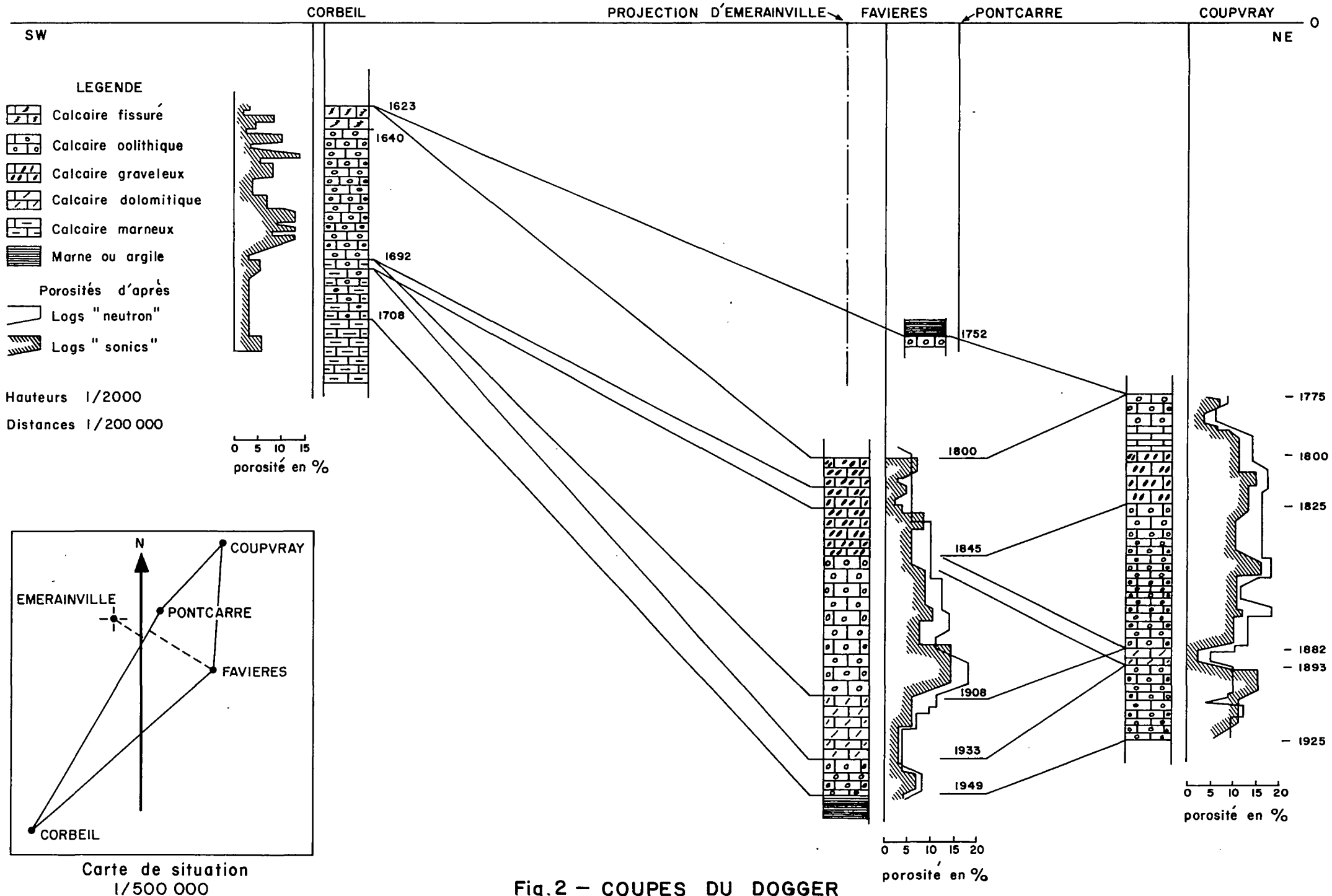
- Le forage de Melun, où nous connaissons le débit et la pression de la nappe qui, diminuée des pertes de charge dans le forage pour ce débit, fournit la pression hydrodynamique (ou pertes de charges dans le terrain pour ce même débit).

La formule d'écoulement permanent permet d'estimer la perméabilité :

$$Phq = \frac{qv}{2\pi kh} \ln \frac{R}{r}$$

avec :

Phq : pression hydrodynamique de débit = 4 kg
q : débit = 3,78 10⁴ cm³/seconde
v : viscosité du liquide = 0,4 centipoise
k : perméabilité en darcies



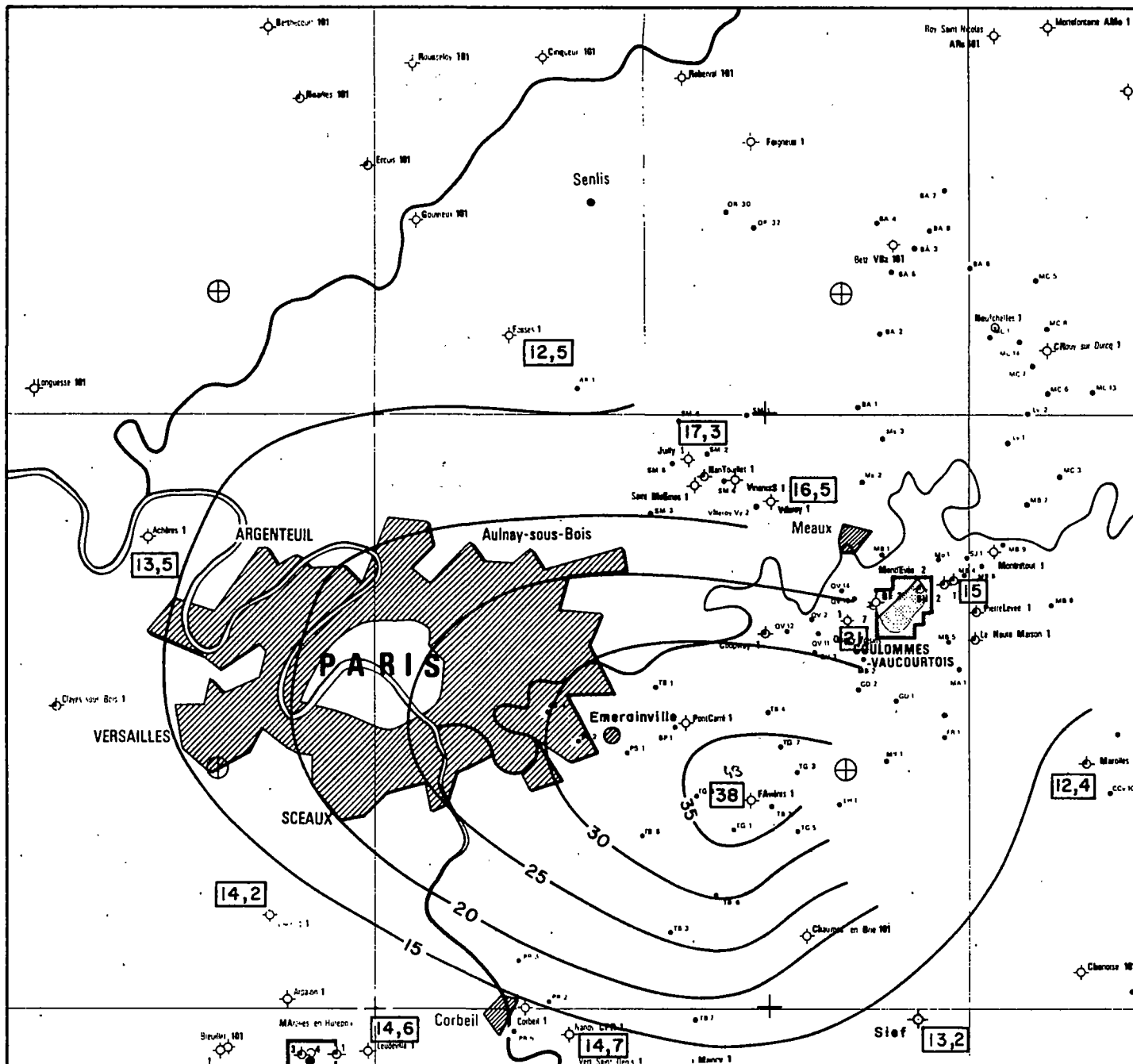





Fig. 3 - Carte des pressions de gisement au toit du Dogger

1/500000

(en kg/cm^2 au dessus du niveau de la mer)

-  Forage
-  Pression
-  Courbe isopièze

Nota : D'après cette carte, la pression au sol à Emerainville, cote 109, serait de $32 - 10,9 = 21,1 \text{kg}$

h : épaisseur du réservoir en cm
r : rayon du puits en cm
R : rayon d'action du puits en cm.

Faute de connaître cette grandeur qui varie d'ailleurs avec le temps, certains auteurs prennent $\ln \frac{R}{r} = 2\pi$.

Dans ces conditions, on trouve, pour le forage de Melun, $k = 0,4$ darcie; valeur qui, d'après ce qui vient d'être dit, serait une valeur par excès.

- Les tests réalisés dans les forages pétroliers qui malheureusement portent sur des temps de mesure courts ; leurs résultats ne concernent que des régions très proches du forage et sont difficilement extrapolables à la partie du réservoir intéressé par l'exploitation. Différents tests réalisés dans le Dogger du bassin de Paris fournissent une valeur de $k = 0,1$ darcie, valeur par défaut.

Afin d'illustrer l'effet des variations de k sur les pressions d'extraction (ou sur les profondeurs de pompage) et sur les pressions d'injection, les calculs ont été faits pour ces deux valeurs de k qu'il est prudent toutefois de ne pas considérer comme des limites extrêmes.

5 - PRESSIION DE GISEMENT

La pression de gisement peut être exprimée soit par rapport au niveau de la mer (en kg/cm^2 ou hauteur de colonne d'eau - pour une eau de densité 1), soit par rapport au sol. Ce dernier mode d'expression permet de rendre compte d'un artésianisme éventuel et de calculer la dépression à exercer par pompage pour obtenir le débit demandé.

La figure 3 donne une carte des pressions par rapport à la mer. On y remarquera que les pressions sont mal connues aux forages les plus proches du projet. Les pressions mesurées dans des régions plus lointaines montrent, dans toutes les directions, un accroissement de pression vers Emerainville. Cet indice est favorable à un artésianisme fort. La seule mesure proche dont nous disposons, celle de Favières, va dans le même sens, et indiquerait une pression élevée de l'ordre de 38 kg au-dessus de la mer, soit 27 kg au-dessus du sol. Malheureusement, elle doit être quelque peu suspectée faute de confirmation par une mesure voisine. Dans les calculs nous envisagerons donc différentes hypothèses de pression pour montrer l'influence de sa variation.

A cet effet, nous avons retenu les pressions suivantes exprimées en kg/cm^2 au sol :

- 20 kg soit 7 kg de moins qu'à Favières, point de pression mesurée maximale ;
- 10 kg soit la pression déjà estimée à Corbeil ;
- 15 kg, moyenne des deux chiffres précédents et valeur vraisemblablement la plus proche de la réalité.

6 - HYDRODYNAMISME NATUREL

La même carte montre que l'eau de la nappe s'écoule de Pontcarré vers l'Ouest avec un gradient G de l'ordre de 0,13 kg par km. La vitesse de cet écoulement

$$V = - \frac{k G}{p v}$$

avec k = perméabilité, p = porosité, v = viscosité, est de l'ordre de 3,10 m par an.

En 30 ans, l'hydrodynamisme naturel déplacera l'eau de 95 m environ, soit près de 10 % de la distance entre 2 forages (voir ci-dessous). Il est donc prudent d'implanter le puits d'injection à l'aval du puits d'extraction, soit vers l'Ouest. L'effet de l'hydrodynamisme naturel pourra alors contrarier, dans une faible mesure il est vrai, l'appel de l'eau froide injectée vers le puits d'extraction qui lui, engendre un déplacement de l'ordre de 1000 m.

7 - ESPACEMENT ENTRE LES FORAGES D'EXTRACTION ET D'INJECTION

L'injection de l'eau utilisée dans la couche d'origine présente le double avantage d'entretenir la pression naturelle du réservoir et de résoudre le problème de l'évacuation de l'eau extraite car celle-ci est polluante en raison de sa température (+ 30°C) et de sa salure (25 g/l).

Cependant, l'injection doit être faite à une distance telle du prélèvement que l'eau froide ne puisse atteindre le puits d'extraction avant un délai égal à la durée du doublet.

Un programme de calcul a permis d'établir un abaque donnant cet espacement en fonction de l'épaisseur utile du réservoir, de la porosité, de la durée supposée du doublet (30 ans) et des débits d'extraction.

L'abaque donne, suivant cette dernière variable, les espacements ci-dessous :

460 m	pour un débit de	50 m ³ /h
660 m	"	100 m ³ /h
840 m	"	150 m ³ /h
960 m	"	200 m ³ /h.

Il est donc raisonnable d'espacer les forages de 1000 m (l'hydrodynamisme de la nappe assurant une "garde" supplémentaire de 95 m).

8 - CHIMIE DES EAUX - MESURES PHYSICO-CHIMIQUES NECESSAIRES

La composition chimique des eaux traduite en équivalent de NaCl est représentée sur la figure 4. Il faut s'attendre à rencontrer dans le Dogger des eaux chargées à environ 25 g/l.

Des compositions chimiques types d'eaux du Dogger de la région sont rassemblées sur le diagramme de la figure 5. On notera cependant qu'il s'agit de forages relativement lointains et qu'au voisinage d'Emerainville, on ne dispose que de mesures globales de résidu sec montrant que la salure totale atteint 27 g/l à Pontcarré et 30 g/l à Favières. Dès lors, on peut s'attendre à rencontrer des salures de l'ordre de 25 g à Emerainville.

Les compositions détaillées dont nous disposons montrent la nette prédominance des ions Cl et Na (10 g/l de ClNa à Melun pour une salinité globale de 13 g). La teneur élevée en ClNa et la grande solubilité de ce sel permettent de penser qu'à Emerainville, les eaux présenteront la même prédominance mais avec une concentration doublée.

Le caractère incrustant ou agressif des eaux, quant aux variations de teneur en CO², donc en carbonates, en fonction des variations de température et de pression, exige, pour être précisé, le dosage du CO² et la mesure du pH à la tête du puits lors des pompages d'essai. (Cette opération ne peut être faite sur des échantillons transportés qui perdent alors leur CO²).

Le même dosage *in situ* devra concerner l'acide sulfhydrique H^2S qui peut également rendre les eaux agressives.

Le caractère incrustant des eaux concerne également l'injection qui risque de colmater les terrains au voisinage du forage.

Enfin, il est souhaitable de connaître les teneurs en fer, SiO^2 et NH^4 pour les mêmes raisons. Le contrôle de la permanence de la nature chimique des eaux au cours de l'exploitation est souhaitable. Il pourra être assuré globalement par la mesure du pH.

Un pH-mètre à 2 électrodes commutables permettra alors de contrôler les variations d'acidité des eaux extraites et injectées et ceci, au rythme d'une mesure par semaine.

Enfin, la mesure précise de la densité de l'eau extraite à la température de 70° permettra d'affiner le calcul des pressions. Cette mesure sera faite une fois pour toute au cours des pompages d'essai et dès qu'on sera sûr que les caractéristiques physico-chimiques de l'eau sont devenues constantes.

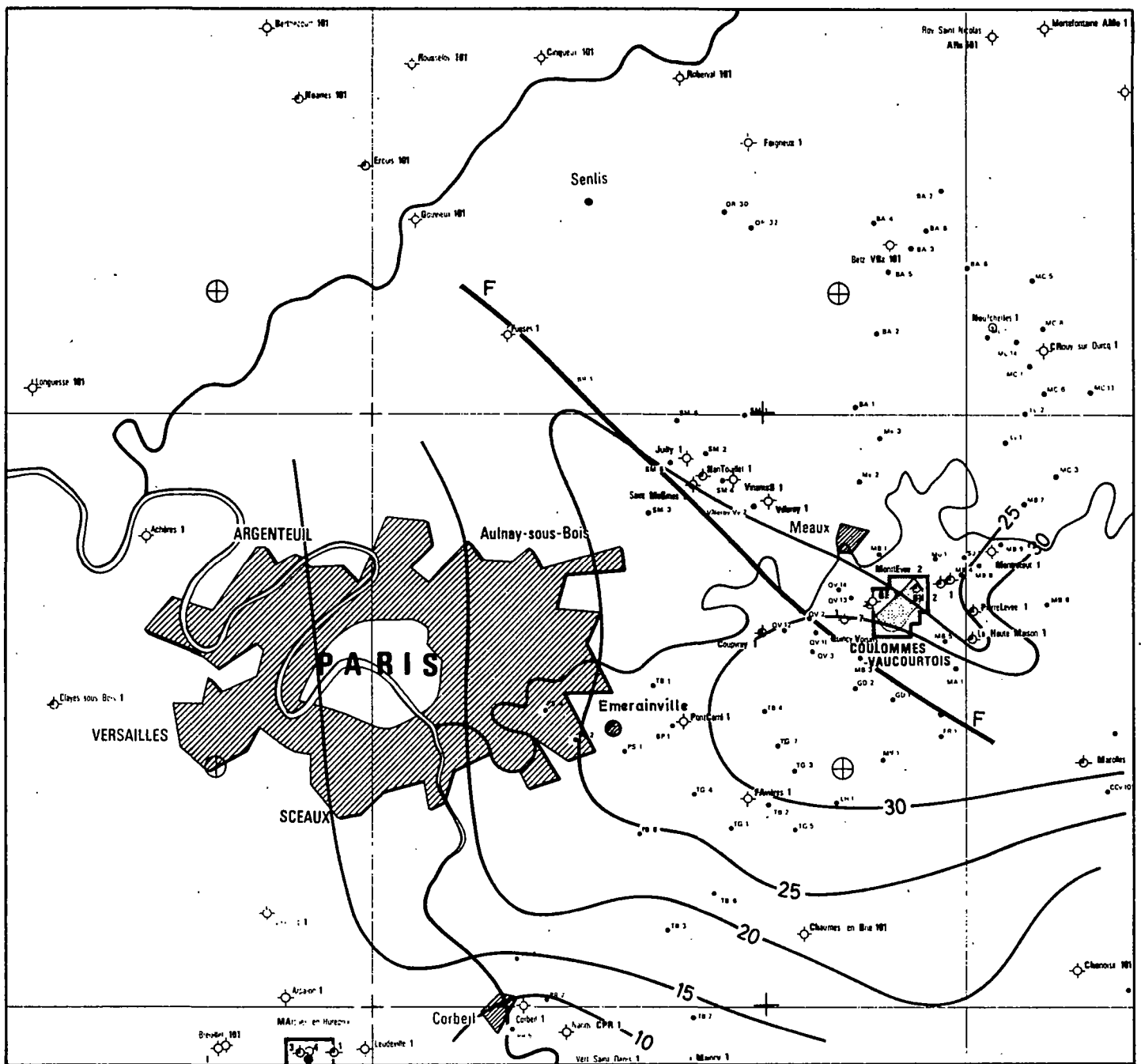


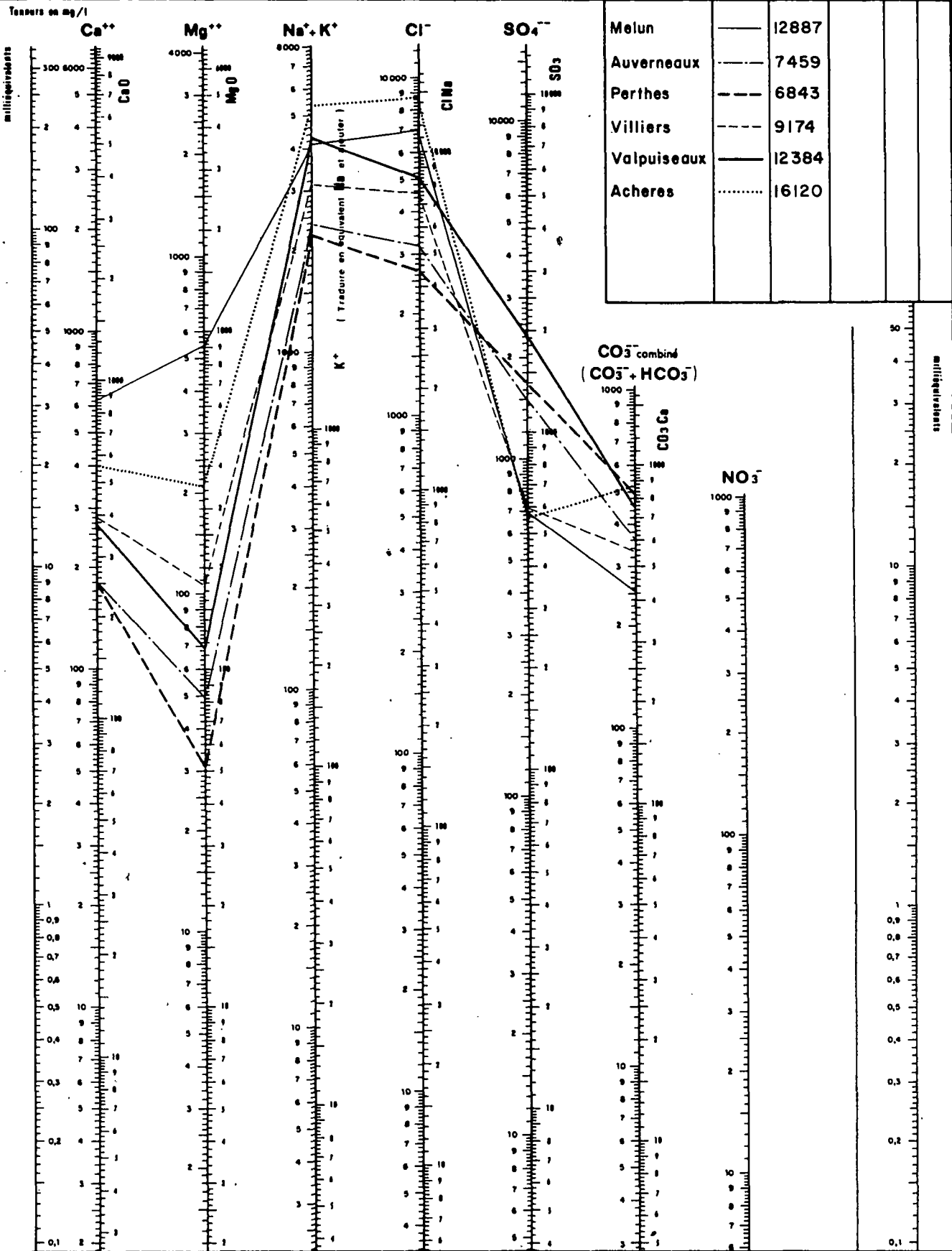
Fig.4 - Carte des salinités du Dogger

1/500000

(en g/l de ClNa)

- ⊕ Forage
- Courbe d'iso-salinité

Figuré	n°	Rés sec mg/l	P ohms/cm	dM	pH
Melun	—	12887			
Auverneaux	---	7459			
Perthes	- - -	6843			
Villiers	----	9174			
Valpuseaux	—	12384			
Acheres	16120			



IV - POMPAGE ET INJECTION. ESTIMATION DES PRESSIONS

1 - GENERALITES

Dans un forage en communication avec une nappe captive, l'eau de cette nappe peut remonter jusqu'au point où s'établirait un équilibre entre le poids de la colonne d'eau ainsi constituée et la pression de la nappe.

Pour une pression de nappe assez forte, la cote du point d'équilibre peut être supérieure à la cote de la tête du puits et l'eau s'écoule, le forage étant dit artésien.

La différence entre les deux cotes précitées exprime, pour une eau de densité égale à l'unité, la pression motrice de cet écoulement. Celle-ci, ou pression de débit, est égale à la somme des baisses de pressions ou pertes de charges engendrées par les pertes d'énergie par circulation dans le tubage et les terrains.

En abaissant le point de captage par pompage, on augmente cette pression de débit. Quand le forage n'est pas artésien, la pression de débit de la pompe représente la somme de la pression d'écoulement et de la pression nécessaire à l'élévation de l'eau du point de stabilisation dans le tube à la surface du sol.

2 - EXPRESSION DES FAITS

La formule suivante rend compte de tous les cas :

$$P_{dq} = P_g - P_{cq} - P_{hq}$$

avec :

P_{dq} : pression de débit de la pompe,

P_g : pression du gisement mesurée à la tête du puits (elle correspond à la différence de cote entre le point de stabilisation et le sol. Elle est négative si le forage n'est pas artésien),

P_{cq} : pertes de charges dans l'équipement du forage (crépines, tubes, pompes, ...) au débit demandé,

P_{hq} : pression hydrodynamique de débit ou perte de charge dans les terrains au débit demandé.

Nota : on ajoute parfois au second membre de l'équation une grandeur ΔP_q qui prend en compte des variations de pertes de charge dans le terrain, provoquées au voisinage du puits par des variations de perméabilité de l'aquifère. A ce stade du calcul, ΔP_q ne peut être pris en considération puisqu'il est lié aux conditions locales qu'on ne connaîtra qu'après forage. (Cet effet "pariétal" ΔP_q peut également résulter de variations de viscosité de l'eau).

Cette formule, valable pour le puits d'extraction, s'applique également au puits d'injection, mais puisque l'eau y circule en sens inverse, les pertes de charges changent de signe :

$$P_{iq} = P_g + P_{cq} + P_{hq}$$

avec P_{iq} : pression d'injection
le facteur ΔP_q étant ici aussi négligé.

3 - PRESSION DE GISEMENT (Pg)

Celle-ci a été établie et discutée au paragraphe III, 5 où il est montré qu'il convient, par prudence dans le cas d'Emerainville, de prendre plusieurs valeurs en considération. Elle est finalement exprimée en pression au-dessus du sol. Le forage doit naturellement être artésien.

4 - PERTES DE CHARGES DANS L'EQUIPEMENT DE FORAGE (Pcq)

Celles-ci sont données pour différents débits à partir d'abaques prenant en compte les diamètres, longueur de forages, viscosité de l'eau, etc..

5 - PRESSION HYDRODYNAMIQUE DE DEBIT (Phq)

Cette pression est calculée en considérant qu'elle résulte :

- au puits de pompage, de la différence entre la pression hydrodynamique de débit du puits de pompage seul et la pression hydrodynamique d'injection au même puits puisque l'injection assure le rétablissement de la pression dans la nappe (la transmission des pressions est quasi immédiate en nappe captive) ;

- au puits d'injection, de la différence entre la pression hydrodynamique d'injection du puits d'injection seul et la pression hydrodynamique de débit au même puits puisque l'extraction abaisse la pression de la nappe.

Toutes ces pressions hydrodynamique résultant de pertes de charges dans le terrain sont données par la formule de THEIS :

$$P = \frac{0,183 Q \sqrt{v}}{k h} \log \frac{2,25 k t}{p.v.c r^2} \quad (1)$$

avec

P : pression en un point de l'aquifère à la distance d du puits avec, comme cas particulièrement intéressants dans cette étude :

d = r = rayon du puits

d = R = distance à l'autre forage

Q : débit

v : viscosité de l'eau (en centipoises)

h : épaisseur de l'aquifère

k : perméabilité de l'aquifère (en darcies)

c : coefficient de compressibilité de l'aquifère (somme des coefficients de compressibilité de l'eau et de la roche)

p : porosité en %

t : temps écoulé depuis les démarrages (simultanés ici) des pompes d'injection et d'extraction.

6 - PUITS D'EXTRACTION

La pression hydrodynamique de débit est donnée par la différence suivante (paragraphe précédent) :

$$Phq = \frac{0,183 Qv}{k h} \log \frac{2,25 kt}{p v c r^2} - \frac{0,183 Qv}{k h} \log \frac{2,25 kt}{p v c R^2} \quad (2)$$

où :

le premier terme représente la pression induite par le puits d'extraction, ou la pression à la paroi du forage, donc d = r (rayon du puits),

le second terme représente la pression induite au forage d'extraction par le puits d'injection situé à la distance $d = R$.

On notera que :

- le volume d'eau froide injecté est très faible par rapport au volume du réservoir et que cette eau froide restera au voisinage du point d'injection. Pour le forage d'extraction, la viscosité à prendre en compte dans les deux termes est donc celle de l'eau chaude ;
- pour les mêmes raisons, on prendra le même coefficient de compressibilité aux deux forages ;
- puisque les pompages démarrent en même temps, l'équation peut se simplifier

$$Phq = \frac{0,366 Qv}{k h} \log \frac{r}{R} \quad (3)$$

et la pression Phq est indépendante du temps.

7 - PUITS D'INJECTION

Au puits d'injection, Phq est exprimé par la même différence :

$$Phq = \frac{0,183 Qv'}{k h} \log \frac{2,25 kt}{p v' c' r^2} - \frac{0,183 Qv}{k h} \log \frac{2,25 kt}{p v c R^2} \quad (4)$$

où :

le premier terme est cette fois la pression induite par le puits d'injection et le second la pression induite par le puits d'extraction.

Par contre, on notera que :

- la viscosité de l'eau froide affecte la pression au voisinage du puits d'injection. On doit donc tenir compte des viscosités différentes de l'eau à la température d'injection v' et à la température d'extraction v ;
- cependant, l'effet de la viscosité de l'eau froide restant limité au voisinage du forage, le résultat sera minoré de 4 % ;
- le coefficient de compressibilité varie également mais les deux valeurs de c et c' étant très voisines, elles seront confondues.

Les calculs ont été faits à partir des données suivantes :

Q en cm^3/s , pris successivement équivalent à 50, 100, 150, 200 m^3/heure , soit :

$1,38 \cdot 10^4$, $2,77 \cdot 10^4$, $4,15 \cdot 10^4$, $5,54 \cdot 10^4$ cm^3/s

$k = 0,4$ et $0,1$ darcie.

$h = 10\ 000$ cm

$p = 13$ %

$c = 1,02 \cdot 10^{-4}$

$v' = 0,8$ centipoise

$v = 0,4$ centipoise

$r = 7,6$ cm

$R = 10^5$ cm.

8 - RESULTATS

Les résultats figurent dans le tableau 1 pour le puits d'extraction. On a tenu compte des différentes valeurs de P_g déterminées au paragraphe III.5 et de celles de P_{cq} définies en VI.4.

Les résultats pour le puits d'injection sont donnés par le tableau 3. Les valeurs de Ph_{qi} (1er terme de la formule pour l'injection) et Ph_{qd} (second terme) y sont explicitées puisque la formule ne peut, dans ce cas, être simplifiée.

On a également tenu compte des durées qui influent sur le résultat.

Par contre, le tableau 3 ne tient compte que de la valeur de $P_g = 20 \text{ kg/cm}^2$. Les résultats pour $P_g = 20, 15$ et 10 kg/cm^2 sont donnés par le tableau 4.

8.1 - Puits d'extraction

Tableau 1 : Puits d'extraction
Pression de débit (ou de pompage) en kg/cm^2

		$P_g = + 20$		$P_g = + 15$		$P_g = + 10$	
Débits ↓	k	0,4	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1
50 m ³ /h = 1,38.10 ⁴ cm ³ /s	+ P_g	+ 20,00	+ 20,00	+ 15,00	+ 15,00	+ 10,00	+ 10,00
	- P_{cq}	- 1,00	- 1,00	- 1,00	- 1,00	- 1,00	- 1,00
	- Ph_q	- 2,10	- 8,30	- 2,10	- 8,30	- 2,10	- 8,30
	P_{dq}	≈ + 17,00	+ 11,70	≈ + 12,00	+ 6,70	≈ + 7,00	+ 1,70
100 m ³ /h et $P_{cq} = -1,6$		≈ + 14,20	+ 1,60	≈ + 9,20	- 3,40	≈ + 4,20	- 8,40
150 m ³ /h et $P_{cq} = -3,2$		+ 10,60	- 8,20	+ 5,60	- 13,20	+ 0,60	- 18,20
200 m ³ /h et $P_{cq} = -5$		+ 6,70	- 18,40	+ 1,70	- 23,40	- 3,30	- 2,84

Nota :

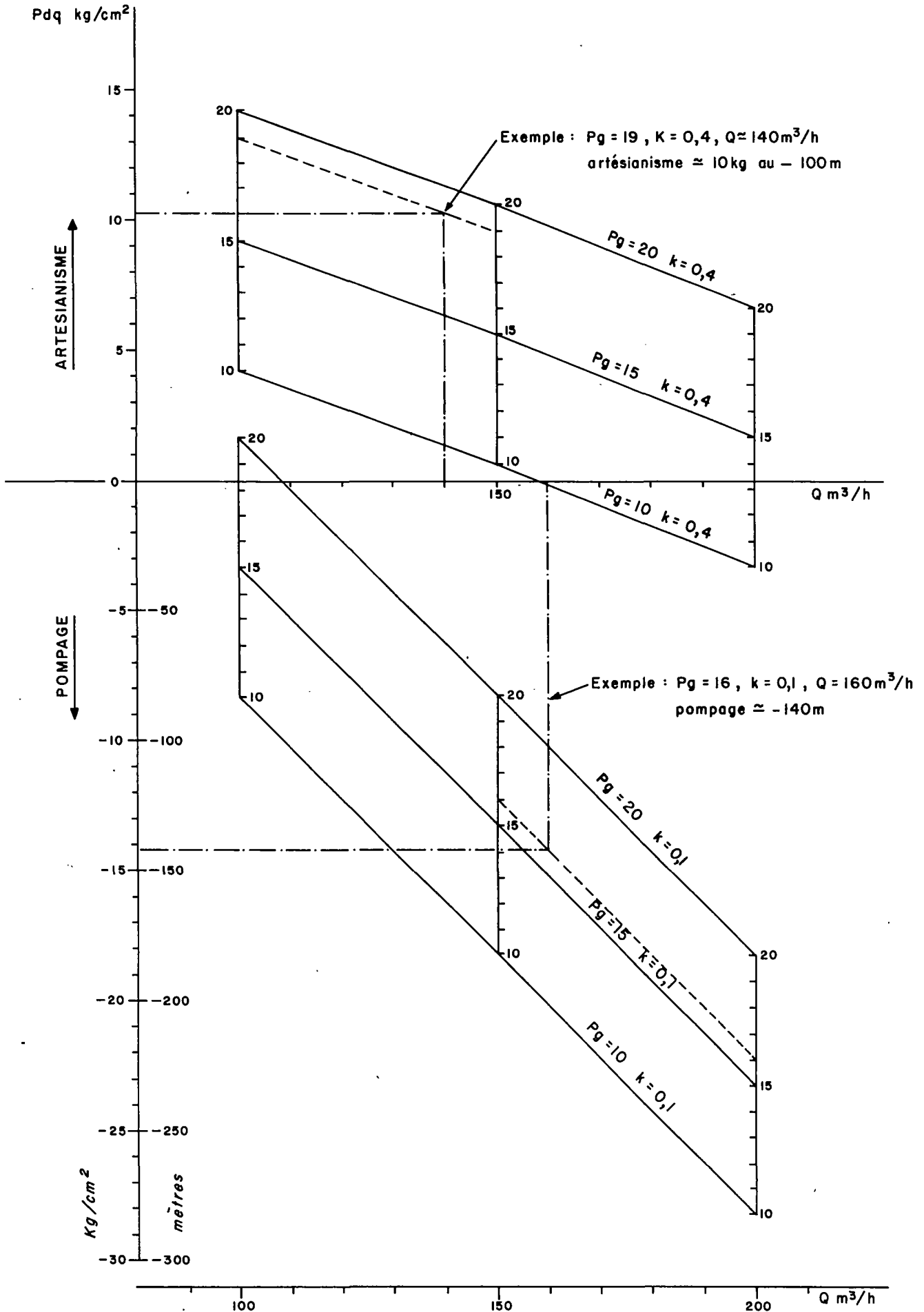
- 1) Le calcul est explicité pour 50 m³/h seulement.
- 2) $P_{dq} = - 18,40$, cas où le forage n'est pas artésien. Lorsque P_{dq} est positif, P_{dq} exprime une pression résiduelle qui, non utilisée par ouverture du forage au niveau du sol, engendrerait un débit supérieur au débit indiqué à moins qu'on ne maintienne cette pression et réduise ce débit par vannage.

Pour une eau de densité 1, la profondeur de pompage peut être tirée immédiatement du tableau 1. Les profondeurs réelles seront d'ailleurs très voisines, la salure alourdissant quelque peu l'eau, mais la température l'allégeant.

Les résultats sont regroupés ci-après (tableau 2) selon les deux hypothèses de perméabilités et exprimés en profondeurs.

Fig. 6 - Puits d'extraction

Abaque de détermination de P_{dq} en fonction de Q , P_g , et k



Augmentés d'une garde de 10 m d'eau au-dessus de la pompe, ils fourniront les positions de la crépine de la pompe dans le tube d'extraction au-dessous de la tête du puits.

Tableau 2 : puits d'extraction - profondeurs de pompage

Pg →		Pg 20		Pg 15		Pg 10	
Q↓	k →	0,4	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1
	50 m ³ /h	0	0	0	0	0	0
	100 m ³ /h	0	0	0	- 34 m	0	- 84 m
	150 m ³ /h	0	- 82 m	0	- 132 m	0	- 182 m
	200 m ³ /h	0	- 184 m	0	- 234 m	- 33 m	- 284 m

Ces tableaux montrent l'importance des perméabilités et des pressions de gisement qui ne seront connues avec précision qu'après la réalisation d'un premier forage.

On remarquera que pour la perméabilité élevée $K = 0,4$, le forage d'extraction sera artésien dans tous les cas sauf un et qu'il le sera en tout état de cause si l'on demande un débit égal ou inférieur à 150 m³/h.

Pour la perméabilité faible ($K = 0,1$) et en limitant la profondeur de pompage à 150 m, l'obtention de 150 m³/h reste possible dans tous les cas sauf un.

Dans ces conditions, l'opération présente de très fortes chances d'être réalisable.

En effet, la pression de gisement exprimée en pression au-dessus du sol (artésianisme) la plus probable qu'on puisse rencontrer sera probablement proche de 15 kg/cm² (les résultats correspondants sont encadrés).

Les abaques de la figure 6 résument ces variations. On constate que les courbes représentatives sont quasi linéaires et que, par interpolation entre les pressions de gisement + 20 et + 10, on peut estimer la valeur de P_{dq} .

Remarque : Pour les forages artésiens où le rabattement de la nappe (baisse de pression provoquée par l'ouverture du forage au niveau du sol, ou par pompage) reste inférieur à 25 % de la profondeur de la nappe, ce qui est le cas, le débit est proportionnel au rabattement ($P_g + P_{dq}$). La non-linéarité des courbes représentatives vient de ce qu'on a tenu compte des pertes de charges dans les tubages, et éventuellement des viscosités différentes des eaux chaudes et froides (cas du calcul de P_{iq}).

8.2 - Puits d'injection

Le tableau 3 montre que la pression d'injection croît légèrement avec le temps, mais augmente surtout avec l'abaissement des perméabilités. Ces valeurs ont été calculées pour la seule pression de gisement au sol de 20 kg/cm².

Tableau 3 : puits d'injection

Pression d'injection P_{iq} en kg/cm^2 pour $K = 0,4$ et $0,1$
 $P_g = 20 \text{ kg/cm}^2$ et $Q = 50, 100, 150, 200 \text{ m}^3/\text{h}$

Durée →		$10^6 \text{ s} = 11,5 \text{ j}$		$10^8 \text{ s} = 3,2 \text{ ans}$		$10^9 \text{ s} = 32 \text{ ans}$	
$Q \downarrow$	$k =$	0,4	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1
50 m^3/h $P_{cq} = 1$	+ P_g	+ 20	+ 20	+ 20	+ 20	+ 20	+ 20
	+ P_{cq}	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1
	+ P_{hqi}	+ 4,6	+ 17,3	+ 5,6	+ 21,3	+ 6	+ 23,3
	- P_{hqd}	- 0,3	- 0,6	- 0,8	- 2,65	- 1	- 3,7
	+ P_{iq}	+ 25,3	+ 37,7	+ 25,8	+ 39,65	+ 21	+ 40,6
100 m^3/h ; $P_{cq} = 1,6$	+ P_{iq}	30,3	59,9	31,3	59	32,8	61,3
150 m^3/h ; $P_{cq} = 3,2$	+ P_{iq}	36,3	71,3	37,7	84,4	38,6	80,2
200 m^3/h ; $P_{cq} = 5$	+ P_{iq}	42,2	89,5	44,2	95,4	47,5	100,4

Nota : seul le calcul pour 50 m^3/h a été détaillé.

Le tableau 4 donne les pressions d'injection calculées pour les pressions de gisement de 20, 15 et 10 kg/cm^2 pour les perméabilités 0,4 et 0,1 après 32 ans de fonctionnement.

Parmi les pressions de gisement, la pression de 15 kg/cm^2 est la plus probable (encadrée dans le tableau 4).

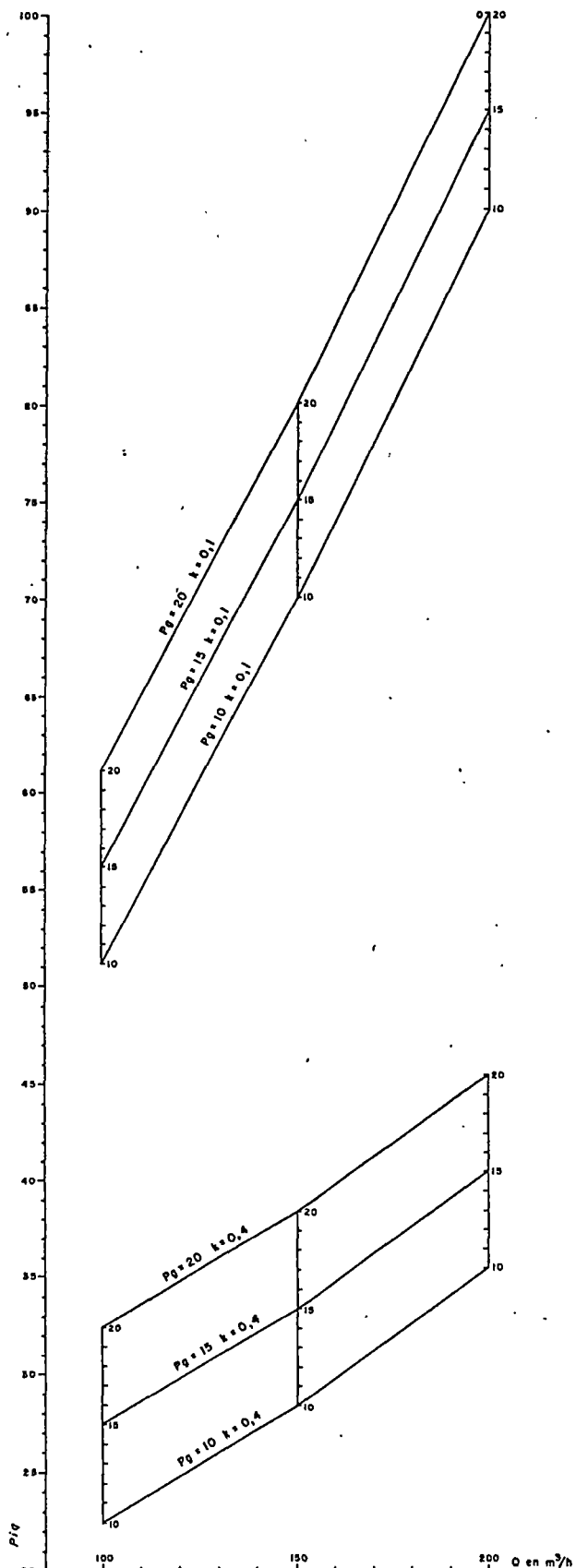
Tableau 4 : puits d'injection

Pression d'injection pour différents débits
 et différentes pressions au sol. P_g

$P_g \rightarrow$		20 kg/cm^2		15 kg/cm^2		10 kg/cm^2	
$Q \downarrow$	$k \rightarrow$	0,4	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1
50 m^3/h		26,1	40,6	21,1	35,6	16,1	30,6
100 m^3/h		32,8	61,3	27,8	56,3	22,8	51,3
150 m^3/h		38,6	80,2	33,6	75,2	28,6	70,2
200 m^3/h		47,7	100,4	40,7	95,4	35,7	90,4

Les abaques de la figure 7 permettent de déterminer les pressions d'injection pour les valeurs intermédiaires entre 10 et 20 kg/cm^2 .

Nota : les remarques sur la quasi-linéarité des courbes s'appliquent également à cet abaque.



Abaque de détermination des pressions d'injections P_{iq} en fonction de Q , P_g et k
 Fig. 7 — Puits d'injection

9 - PRESSION HYDRODYNAMIQUE D'INJECTION Phq ET PRESSION DE FRACTURATION

La pression de fracturation des roches ne doit pas être dépassée par la pression hydrodynamique d'injection afin que l'eau du Dogger ne puisse envahir les couches sus-jacentes. En effet, soumises par l'eau à une contre-pression dirigée de bas en haut et égale à leur poids, les couches sus-jacentes peuvent commencer à se soulever et s'ouvrir si l'eau d'injection pénètre leurs fissures.

Cette pression de fracturation correspond à la pression subie par les couches immédiatement sus-jacentes et calculée en tenant compte de la densité "humide" des couches surincombantes et de leur épaisseur.

Cette pression de fracturation est donc le poids d'une colonne unité haute de 1 700 m et dans laquelle on peut estimer :

- que la moitié des roches sont argileuses et que, saturées à 60% d'eau, elles ont une densité de 1,60 ;
- que la moitié des roches sont calcaires et gréseuses et que, saturées à 40 % d'eau, elles ont une densité de 1,90.

La pression de fracturation est donc de

$$\rightarrow \left(\frac{1,60 + 1,90}{2} \right) 1\,700 = 2970 \text{ mètres d'eau ou } 297 \text{ kg}$$

La pression de gisement au niveau du Dogger est égale au poids d'une colonne d'eau comprise entre le toit du Dogger et le sol, augmentée de la pression de gisement au sol.

Les roches subissent donc déjà naturellement, à la base du tubage, une pression de :

190 kg/cm² ; 185 kg/cm² ; 180 kg/cm²
selon les valeurs de pression de gisement.

La surpression provoquée par l'injection ne doit donc pas dépasser les valeurs de :

$$297 - 190 = 107 \text{ kg/cm}^2 ; 297 - 185 = 112 \text{ kg/cm}^2 ; 297 - 180 = 117 \text{ kg/cm}^2$$

Ainsi pour Phq (Phq = Phqi - Phqd) égal à 75,4 kg/cm² (correspondant à Q = 200 m³/h et k = 0,1), la marge de sécurité est de : 107 - 75,4 = 21,6 kg/cm².

Pour Phq = 57 kg/cm² (Q = 150 m³/h ; k = 0,1), la marge monte à 50 kg/cm².

Lorsque la pression de gisement est de 15 kg/cm², il faut s'attendre à disposer d'une marge de sécurité de 51,8 kg/cm² pour Q = 200 m³/h et de 55 kg/cm² pour Q = 150 m³/h.

10 - PUISSANCES DE POMPAGE UTILISEES

Les puissances de pompage Pcv correspondant soit à la pression de débit Pdq, soit à la pression d'injection Piq, sont données par la formule :

$$P_{cv} = \frac{Q \times P_{dq} \text{ (ou } P_{iq}) \times 100}{27 \times 70}$$

avec Pcv en chevaux

Q en m³/h

et un rendement des pompes de 70 %.

En admettant une pression utilisable de 5 kg en tête du puits de production, les tableaux suivants donnent les puissances correspondant aux différents débits et valeurs de Pdq (ou Piq), les perméabilités retenues et les différentes pressions artésiennes envisagées.

10.1 - Extraction (Pd_q)

K = 0,4	Pg 20	Pg 15	Pg 10
50	0	0	0
100	0	0	6
150	0	0	35
200	0	34	88
K = 0,1	Pg 20	Pg 15	Pg 10
50	0	0	9
100	18	44	70
150	104	144	185
200	247	300	353

10.2 - Injection (Pi_q)

K = 0,4	Pg 20	Pg 15	Pg 10
50	68	55	43
100	136	110	86
150	204	165	129
200	272	220	172
K = 0,1	Pg 20	Pg 15	Pg 10
50	107	94	81
100	214	188	164
150	321	282	245
200	428	376	328

11 - PUISSANCE THERMIQUE DISPONIBLE

La puissance thermique disponible P_{th} est fonction du débit Q, de la chute de température utile dans l'échangeur Δt et de la chaleur spécifique C de l'eau :

$$P_{th} = \frac{Q \times C \times \Delta t}{1000}$$

où P_{th} est exprimé en kilothermies
 Q en m^3 /heure
 $C = 1$
 Δt fixée par exemple à 35° .

Les résultats figurent dans le tableau ci-dessous.

Débit	Puissance thermique
50 m^3 /h	1,750 kilothermie
100 m^3 /h	3,500 kilothermies
150 m^3 /h	5,250 "
200 m^3 /h	7,000 "

V - CONCLUSIONS SUR L'ETUDE HYDRODYNAMIQUE

L'obtention d'un débit d'eau chaude de l'ordre de $150 \text{ m}^3/\text{h}$ à la température de 70° est réalisable.

Pour une perméabilité de 0,4 darcies et une pression au sol de 15 kg, le forage sera alors artésien et fournira une pression de service supplémentaire de 5-6 kg.

Le forage sera encore artésien pour une pression de gisement de 10 kg.

Pour cette perméabilité de 0,4 darcies, l'exploitation peut, dans tous les cas, être portée à un débit de $200 \text{ m}^3/\text{h}$, le pompage nécessaire au relèvement de l'eau ne dépassant pas une hauteur de 35 m (3,5 kg) dans le cas le plus défavorable.

Pour une perméabilité de 0,1 darcies, on peut espérer obtenir $150 \text{ m}^3/\text{h}$ avec une pression de 15 kg par un pompage à 150 m de profondeur.

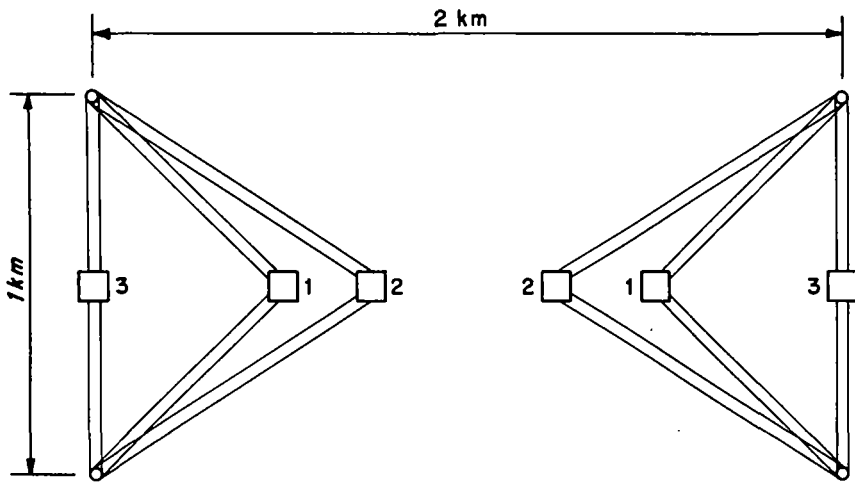
Mais l'étude montre que la perméabilité est d'un effet déterminant sur les caractéristiques des équipements. Dans les deux exemples moyens cités ci-dessus, elle détermine la nécessité d'acquérir ou de ne pas acquérir de pompe d'extraction.

La détermination des perméabilités par pompage d'essai après réalisation des deux forages devra donc être faite avec soin.

Si le forage présente un artésianisme suffisant, les pompages d'essai pourront se faire sans pompe d'extraction. A défaut, il conviendra de demander à l'entreprise de forage de disposer d'une pompe immergée capable de débiter $150 \text{ m}^3/\text{h}$ en puisant l'eau à 150 m de profondeur au moins.

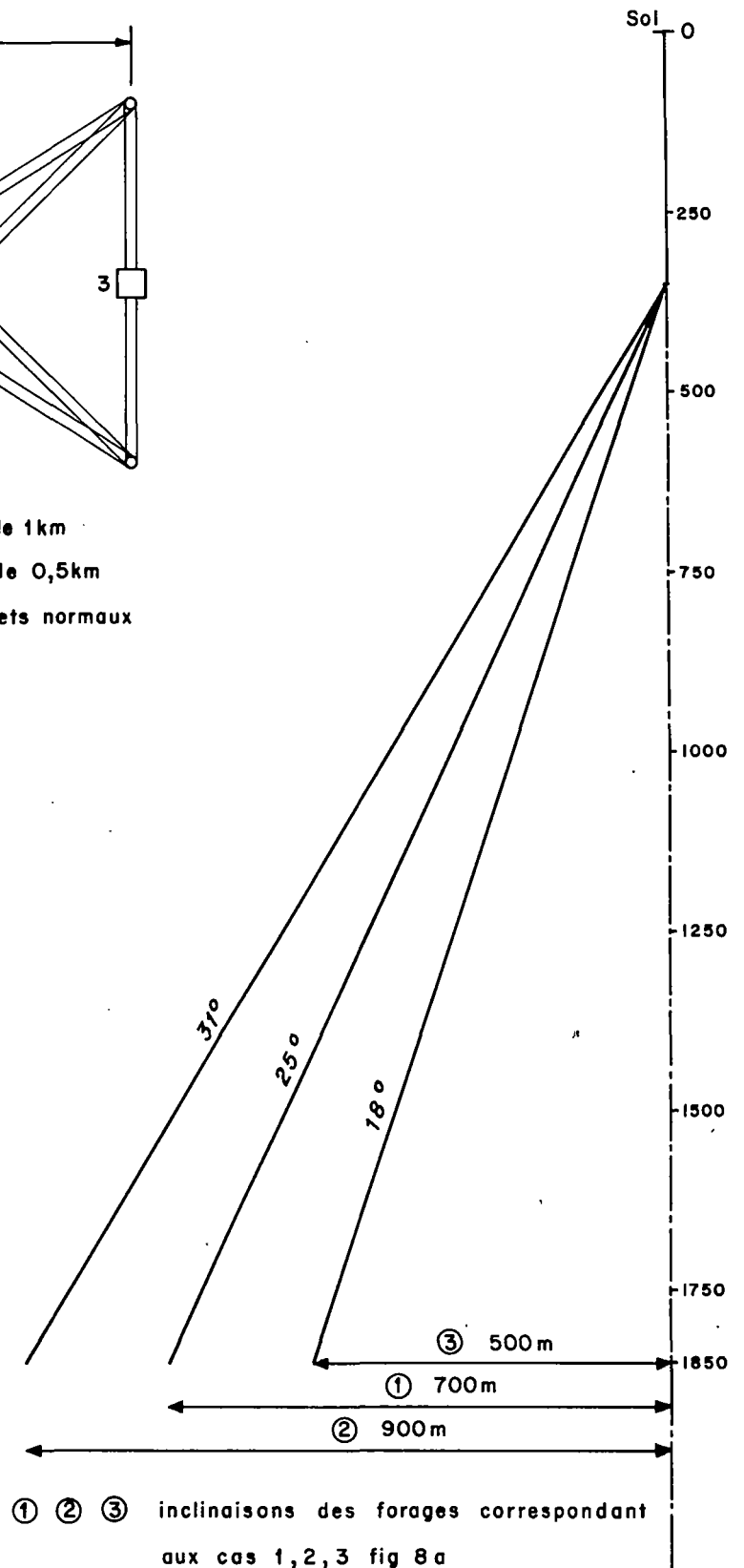
Au cours de chaque essai, le puits d'injection servira de piézomètre. L'eau extraite devra être rejetée dans une rivière (la Marne par exemple) de débit suffisant (de l'ordre de $150 \text{ m}^3/\text{h} \times 20$) afin d'abaisser la température du mélange à 13° environ et sa salinité à 1,5 g/l.

Fig. 8 – Disposition de paires de doublets



- 1- position des têtes de puits distantes de 1km
- 2- position des têtes de puits distantes de 0,5km
- 3- position des têtes de puits de 2 doublets normaux

fig. 8a



- ① ② ③ inclinaisons des forages correspondant
aux cas 1,2,3 fig 8a

fig. 8b

VI - REALISATION DES FORAGES

1 - GENERALITES

1.1 - Forages inclinés

Les forages distants de 1000 m peuvent être verticaux ou inclinés. Dans ce dernier cas, les têtes de puits seront regroupées avec toutes les autres installations en un seul point. Cet encombrement moindre en surface peut présenter des avantages certains. En échange, les forages seront quelque peu allongés. (fig. 8).

1.2 - Forage d'extraction

Le forage d'extraction doit obligatoirement comprendre une partie verticale de longueur et de diamètre suffisants pour contenir la pompe d'extraction si celle-ci est indispensable.

Le diamètre du tubage vertical sera alors de l'ordre de 10 3/4" mais il conviendra de se renseigner d'abord sur le diamètre d'une pompe pouvant fournir le débit qui sera choisi (une garde de 1" de part et d'autre du diamètre de la pompe est nécessaire). Une pompe pouvant fournir un débit de 120 - 150 m³/h a un diamètre de l'ordre de 220 mm et passe donc dans le tube de 10 3/4".

La longueur du tubage vertical sera de l'ordre de 170 m pour un pompage à 132 m (150 m³/h avec $P_g = 15$ m et $k = 0,1$) ou 270 m pour un pompage à 236 m (200 m³/h avec $P_g = 15$ m et $k = 0,1$).

1.3 - Forage d'injection

Le forage d'injection devra être muni d'un système de surveillance anti-pollution en raison des pressions qui y sont exercées. Ce système doit permettre de prévenir la rupture du tubage et l'invasion des nappes superficielles par les eaux d'injection. Il consistera à doubler le tubage d'injection de \emptyset 7" par un tubage \emptyset 9 5/8" sur une hauteur de 350 m environ. Après cette profondeur, le tubage déjà enfoncé de 150 m dans la craie très peu perméable pourra être réduit au tube de 7". Un liquide neutre (GAS-OIL) pourrait être placé entre les 2 tubes. Le contrôle de sa pression permettrait le contrôle de l'étanchéité du système.

Par rapport à l'importante nappe artésienne de l'Albien, on remarquera que la pression d'injection de 75 kg pour 150 m³/h (avec $P_g = 15$ et $k = 0,1$) est égale à la pression de cette nappe (75 kg) et que les risques de fuite sont alors inexistantes.

1.4 - Cas de deux doublets (fig. 8)

On peut implanter deux doublets, donc obtenir une puissance thermique double à condition que les extrémités profondes des forages d'injection soient espacées de 2 km, ainsi que celles des forages d'extraction. Il est possible de rapprocher les deux paires de têtes de puits des doublets en réalisant des forages plus inclinés. Mais vouloir regrouper les 4 têtes de puits en un seul point exigerait une inclinaison des forages aux limites des possibilités pratiques. Aussi ne peut-on guère penser rapprocher les 2 paires de têtes du puits à moins de 1 km. Ceci imposerait à chaque forage incliné selon les arêtes d'une pyramide régulière, un angle de 30° avec la verticale.

1.5 - Intérêt de l'acidification

Avant la mise en production, l'injection d'acide dans chaque forage par les méthodes classiques et souvent utilisées d'acidification (injection sous pression en plusieurs fois d'acide dilué) a de fortes chances d'élargir les fissures et les pores au voisinage des forages. Cet agrandissement des voies de circulation de l'eau aura pour effet d'augmenter la perméabilité dans la région des plus fortes pertes de charges et, diminuant les grandeurs P_{dq} et P_{iq} , d'augmenter les débits.

2 - PROGRAMME DE FORAGES DIRIGES

Le programme de forage peut être envisagé de la manière suivante :

2.1 - Génie civil

Préparation de l'aire de forage : aire libre de 100 m x 100 m ; bournier de 400 m³.

La consommation d'eau industrielle est de l'ordre de 60 m³/j et de 70 à 100 m³/h en cas de pertes totales.

2.2 - Déroutement

Puits d'injection

- Forage en Ø 17 1/2" jusque vers 30 m.
- Tubage en 13 3/8" posé vers 30 m et cimenté au jour.
- Reprise du forage en Ø 12 1/4" jusque vers 350 m.
- Tubage en Ø 9 5/8" cimenté au jour.
- Forage en déviation dirigée en 8 1/2" jusqu'au toit du Dogger vers 1 900 m compte tenu de l'augmentation par déviation.
- Tubage en 7" vers 1 900 m posé à 300 m avec un hanger et cimenté, l'intervalle entre les tubes 9 5/8" et 7" étant rendu étanche et rempli d'un liquide neutre par la suite.
- Forage du réservoir en Ø 5 5/8" jusqu'à la base du réservoir vers 2 040 m. Eventuellement, carottage partiel ou total puis alésage en 6".

Puits de production

- Tubage guide sur 15 à 20 m. Ø 18 5/8".
- Forage en Ø 15" jusqu'à 350 m.
- Tubage en Ø 10 3/4" posé vers 350 m et cimenté jusqu'au jour.
- Forage en déviation dirigée en Ø 8 1/2" jusqu'au toit du Dogger vers 1 900 m.
- Tubage en Ø 7" vers 1 900 m posé vers 270 m de profondeur avec un hanger et cimenté.
- Forage du réservoir en Ø 5 5/8" jusqu'à la base vers 2 040 m ; carottage partiel et alésage à 6".

2.3 - Programme boue

Phase de forage Ø 22" et 15" du puits de production

Phases 17 1/2" et 12 1/4" du puits d'injection

Boue bentonitique : viscosité : 80" à 60"
densité : 1,05 à 1,10
filtrat : 20 cc/30 mn.

Phase de forage Ø 8 1/2" pour les deux puits

Boue bentonitique avec lignosulfonates, améliorée au CMC et contenant 5 à 8 % d'huile :

viscosité : 50"
densité : 1,05 à 1,10
filtrat : inférieur à 10 cc/30 mn

ou

Boue inverse (phase huile émulsionnée dans l'eau).

Phase de forage du réservoir

Eau claire alourdie avec du sel.

2.4 - Composition des tubages

La composition des tubages en matériel pétrolier classique, pour un programme économique et qui devrait être éventuellement revu suivant les problèmes posés par la corrosion, pourra être la suivante :

Forage d'injection

- Tubage Ø 13 3/8" :
nuance d'acier H 40 - épaisseur : 8,38 mm - poids : 48 livres/pied
- Tubage Ø 9 5/8" :
- épaisseur : 8,94 mm - poids : 36 livres/pied
- Tubage Ø 7" : de 0 à 1 900 m environ :
nuance d'acier J 55 - épaisseur : 8,05 mm - poids : 23 livres/pied

Forage de production

- Tube Ø 18 5/8" :
nuance d'acier H 40 - épaisseur : 11,05 mm - poids : 87,5 livres/pied
- Tube Ø 10 3/4" :
- épaisseur : 8,89 mm - poids : 40,5 livres/pied
- Tubage Ø 7" : de 270 à 1 900 m environ :
- épaisseur : 8,05 mm - poids : 23 livres/pied.

2.5 - Opérations S.P.E. (diagraphies)

Le programme proposé pour le puits de production et le puits d'injection pourra être le même, à savoir :

avant la pose du tubage Ø 7" :

- induction log électrique sur le découvert
- diamètreur pour contrôle du trou avant la descente du tubage Ø 7"

après la pose du tubage Ø 7"

Cement Bond Log pour contrôler la cimentation

sur le réservoir

- Latérollog 7, polarisation spontanée
- densité de formation compensée, microdiamètreur.

2.6 - Programme d'essais sur le réservoir

Essai de débit

Le Dogger étant artésien, l'essai de débit pourra être facilement mis en oeuvre en remplaçant l'eau utilisée en forage par de l'eau douce. Le pompage par air lift sera envisagé mais en cas de faible artésianisme, le pompage d'essai défini au paragraphe V, exigeant la pose d'une pompe provisoire, devrait être envisagé.

Essai d'injection

Des essais d'injection pourront être effectués.

3 - EQUIPEMENT DES PUITES

Puits de production

- Il est préférable de commander le groupe de pompage immergé au vu des résultats des pompages d'essai. Compte tenu des délais de livraison, cette pompe ne pourra être mise en place qu'avec un appareil de servicing.
- Le tubing de refoulement aura un diamètre de 6".
- La tête de puits à 3 vannes devra être calorifugée et munie de clapet(s) anti-retour et de manomètres.

Puits d'injection

- Il est préférable de commander le groupe d'injection installé en surface au vu des résultats des pompages d'essai.
- La tête de puits à 3 vannes sera munie de manomètres. Un clapet anti-retour devra être prévu.

Les deux puits devront être équipés d'une protection cathodique.

4 - DELAIS

Les délais donnés ci-après sont valables à compter de la date de l'appel d'offre ou de la commande.

4.1 - Appareil de forage

Les appareils de forage répondant aux caractéristiques requises ne sont pas libres avant quatre mois.

4.2 - Tubes de casing et tubing

10 à 15 mois. Les prix facturés sont ceux qui sont en vigueur au moment de la livraison.

4.3 - Tête de puits

10 à 12 mois.

4.4 - Pompes

Groupe immergé : Les groupes de pompage immergés répondant aux spécifications requises ne sont pas, à notre connaissance, fabriqués en France. Il faut compter un délai de fabrication de 6 à 8 mois.

Groupe d'injection installé en surface : 12 à 18 mois.

VII - DEVIS ESTIMATIF

Cet estimatif comprend :

- la réalisation d'un forage de production et d'un forage d'injection au Dogger conduits en déviation dirigée ;
- l'équipement des puits jusqu'en tête ;
- les pompes.

Cet estimatif ne comprend pas :

- les installations de surface ;
- les frais de service et d'ingénierie.

Les prix indiqués ci-dessous sont estimatifs. Ils ne pourront être connus avec exactitude que lorsque le choix du matériel et les appels d'offres auront été réalisés. Ils s'entendent hors taxes et valables au 1er août 1974. Ils devront être actualisés en conséquence.

1 - FORAGE

- Génie civil	100 000 FF
- Amenée de l'appareil de forage, montage, ripage de l'appareil sur une distance égale ou inférieure à 10 m, repli *	380 000 FF
- 2 forages à 1 860 m y compris : outils, fraises à diamant, produits à boue, déviation dirigée par société de service, descente des tubages, attentes pour contrôle du trou, cimentation et prise	2 000 000 FF
- Tubes de casing	820 000 FF
- Fourniture et pose du hanger, location de l'outil de pose, par société de service	80 000 FF
- Habillage des colonnes	30 000 FF
- Fourniture de ciment et cimentation par société de service	200 000 FF
- Logs S.P.E. par société de service	100 000 FF

2 - ESSAI DE POMPAGE 120 000 FF

3 - EQUIPEMENT DES PUIITS

- 2 têtes de puits	110 000 FF
- Protection cathodique des 2 puits, étude comprise	120 000 FF

Total à reporter 4 060 000 FF

* Ce prix varie entre 300 000 et 400 000 FF suivant la distance entre la base de départ de l'appareil et le lieu de forage.

Report 4 060 000 FF

4 - GROUPE DE POMPAGE

A déterminer après essais :

- Pompe immergée dans forage de production. Appareil de servicing. Mise en place et essais par société de service, prévoir	250 000 FF
- Tube de refoulement du puits de production	50 000 FF
- Pompe de secours, prévoir	200 000 FF
- 2 pompes d'injection installées en surface dont 1 de secours	500 000 FF
	<hr/>
TOTAL	5 060 000 FF
Imprévu 5 %	250 000 FF
	<hr/>
	5 310 000 FF

VIII - CONCLUSIONS GENERALES

L'étude a montré qu'il est possible d'extraire 150 m³/h d'eau artésienne à 70°C si la perméabilité est bonne, et le même débit en pompant à la profondeur de 132 m si la perméabilité est réduite au quart de la valeur estimée pour le cas précédent.

L'incertitude sera levée par des "pompages d'essai" sur les forages. Le premier essai réalisé sur le forage d'injection qui devra être entrepris en premier lieu permettra de connaître la perméabilité, la pression de gisement, les qualités de l'eau.

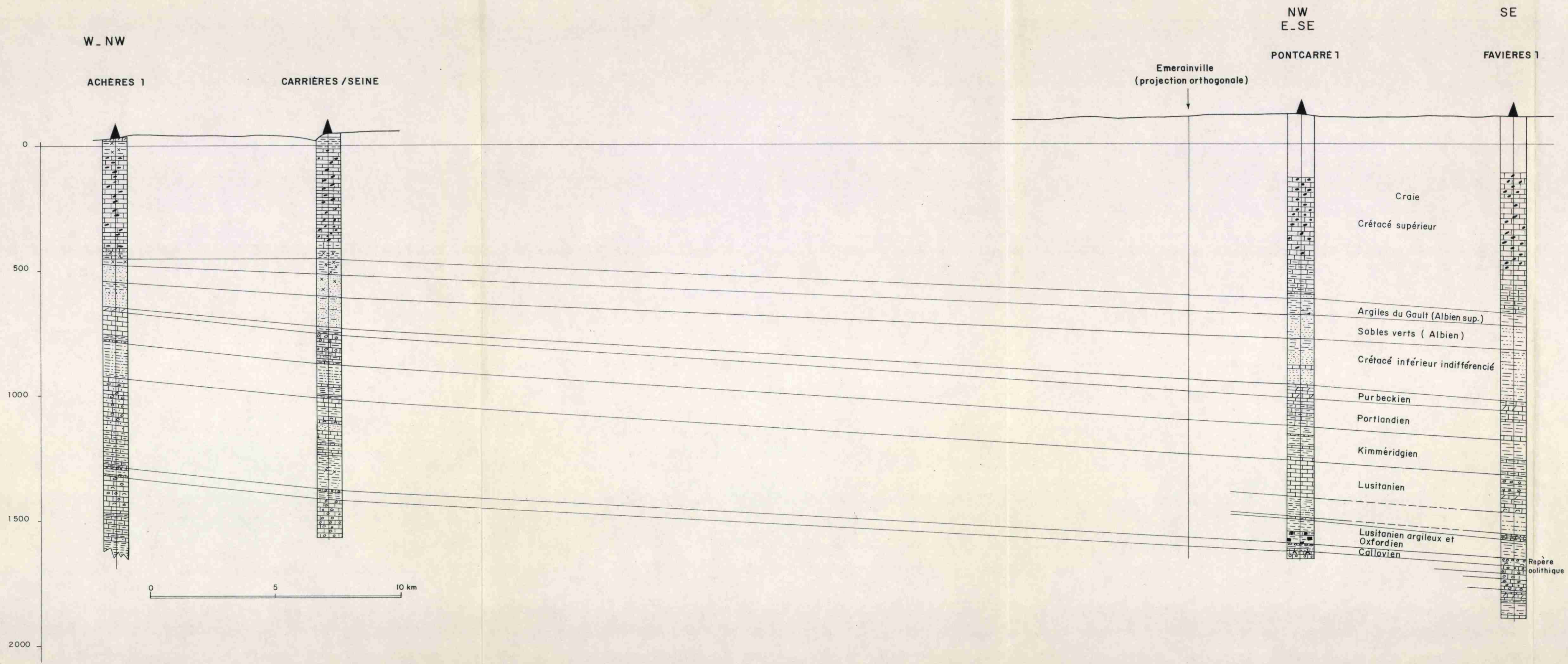
On pourra ensuite choisir le type d'extraction (pompage ou artésianisme) et définir les caractères du forage d'extraction à l'aide des abaques donnés dans cette étude.

Le coût de l'installation peut être estimé à 5 310 000 FF hors taxe et frais d'ingénierie. Une économie de 500 000 FF environ (sans compter une réduction de l'énergie de pompage) est possible en cas d'exploitation par artésianisme.

Il est possible de réaliser un second doublet permettant d'extraire une énergie thermique double.

Le contrôle de la bonne conservation de l'équilibre chimique dans les forages pourra être assuré en permanence par la pose d'un pH-mètre.

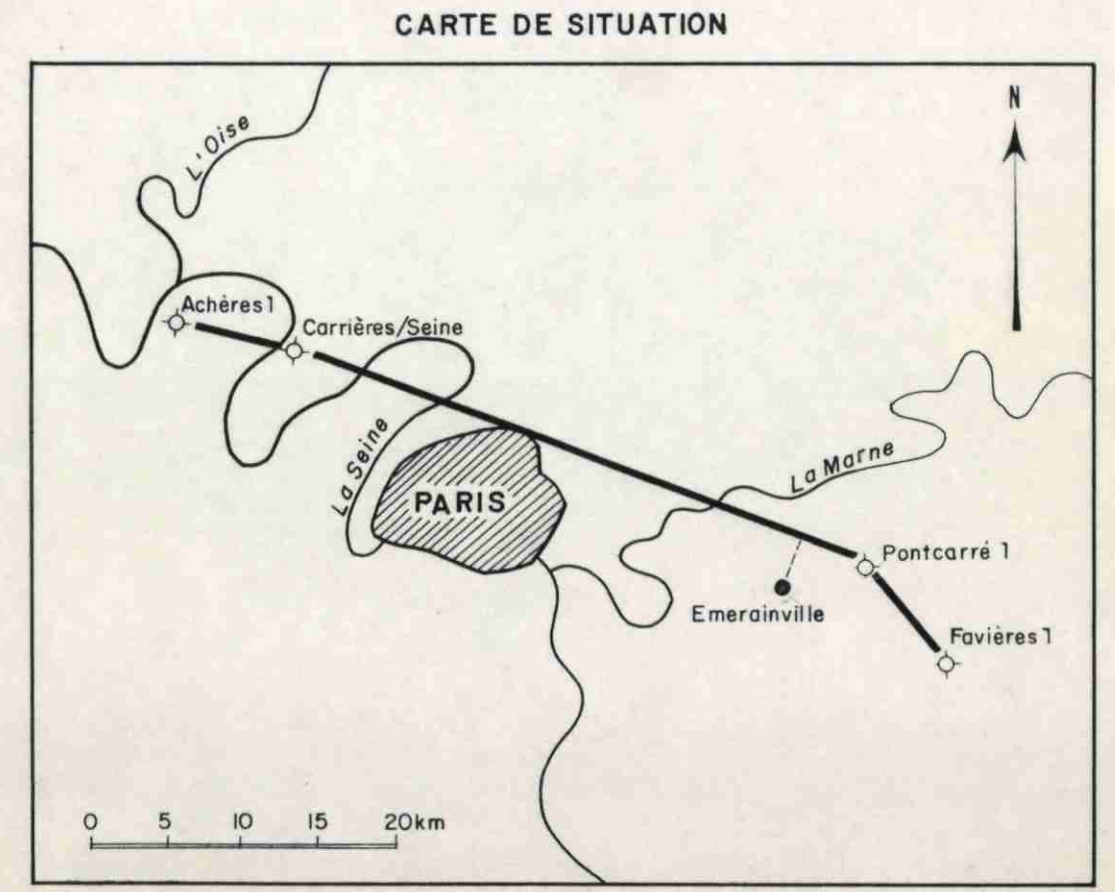
Les précautions contre les risques de pollution comprennent, outre les classiques contrôles de cimentation, la pose d'un double tubage au forage d'injection sur une hauteur suffisante au voisinage du sol. L'étanchéité du système sera contrôlée par la détection des variations de la pression du fluide intercalé entre les deux tubages. Pendant les pompages d'essai, l'eau salée extraite devra être rejetée dans un milieu où elle sera suffisamment diluée pour ne plus être nocive pour l'environnement naturel.

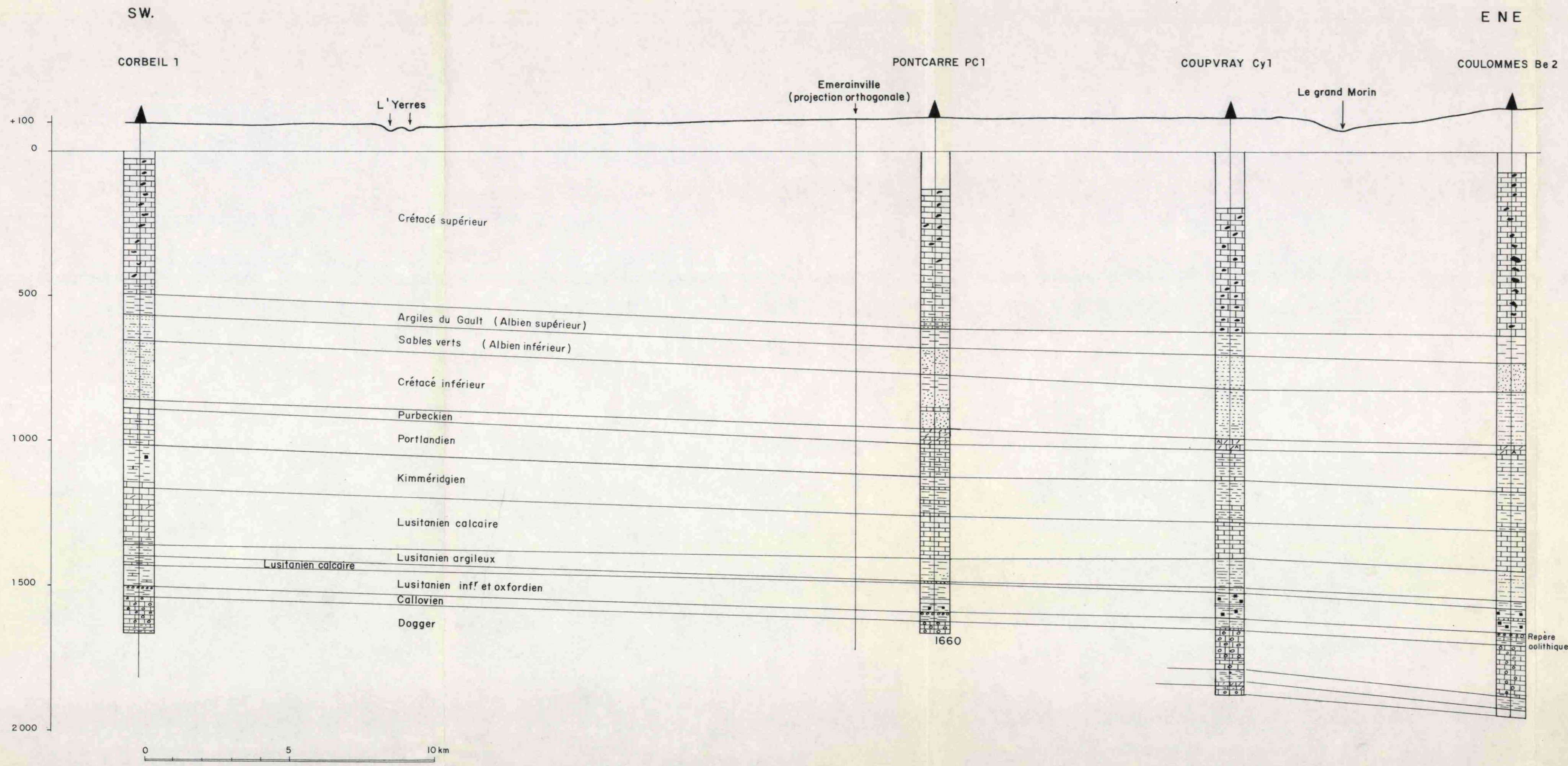


Coupe NW-SE passant par les forages d'Achères 1, Carrières-sur-Seine, Pontcarré 1, et Favières 1

LEGENDE

	Calcaire à silex et craie à silex		grès, sable
	Calcaire marneux ou craie marneuse		grès argileux
	Calcaire dolomitique		argile, marne
	Calcaire oolithique		glauconie
	Calcaire fossilifère		pyrite
	Calcaire gréseux		gypse





Coupe géologique passant à 4km au SE d'Emerainville

LEGENDE

	Calcaire à silex et craie à silex		grès, sable
	Calcaire marneux ou craie marneuse		grès argileux
	Calcaire dolomitique		argile, marne
	Calcaire oolithique		glauconie
	Calcaire fossilifère		pyrite
	Calcaire gréseux		gypse

